TITRES

ET

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DU

Dr André BROCA

Préparateur de physique à la Faculté de médecine.

PARIS

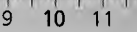
G. STEINHEIL, ÉDITEUR

RUE CASIMIR-DELAVIGNE, 2

1898







TITRES

Élève à l'École polytechnique, 1883-1885.

Sous-lieutenant élève d'artillerie, 1885-1887.

Préparateur de physique à la Faculté de médecine de Paris, 1888-1898.

Docteur en médecine, 1893.

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

PREMIÈRE PARTIE

PHYSIQUE PURE

§ 1. — Optique géométrique.

Dans ces travaux trois questions sont étudiées par le calcul : les aberrations de sphéricité dans les lentilles épaisses et les conditions pour qu'un système centré complexe puisse se compenser au point de vue de ces aberrations ; l'achromatisme des lentilles épaisses ; et enfin la forme de la surface focale conjuguée d'un plan perpendiculaire à l'axe, et dont le pied sur l'axe est un point aplanétique.

Aplanétisme. — Occupons-nous de la première partie. Les théorèmes fondamentaux sont les suivants :

Théorème I. — *Tout système optique possède un nombre déterminé de points, réels ou imaginaires, situés sur une droite déterminée, et jouissant d'une propriété exprimable par une équation.*

Théorème II. — *Tout système centré de révolution possède des points, réels ou imaginaires, situés sur son axe, pour lesquels l'aberration de courbure est du quatrième ordre par rapport à l'ouverture angulaire de la première surface.*

Théorème III. — *Quand on se donne un point sur l'axe d'un système centré sphérique dont on ne limite pas la complication, on peut calculer les données de ce système de manière à rendre très petite l'aberration de sphéricité.*

Une simple construction géométrique montre ensuite qu'on ne peut corriger un système d'aberration donnée qu'avec un autre

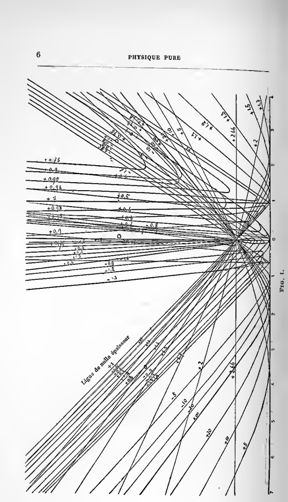


FIG. 1.

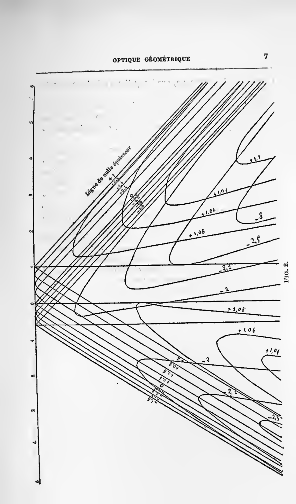


Fig. 2.

dont l'aberration est inverse, que les systèmes soient convergents ou divergents.

Ces théorèmes une fois démontrés, il reste donc à étudier la lentille simple et à voir dans quelles conditions on peut avoir des lentilles simples dont les rayons marginaux sont moins convergents que les centraux.

Le choix des variables est la partie délicate ; prenons les rayons de courbure, la distance des centres, et la distance de l'objet et de ses images successives au centre correspondant. Les équations étant d'ailleurs homogènes, on peut simplifier en prenant des variables purement numériques, les rapports de toutes ces quantités au premier rayon de courbure, ce qui revient à prendre celui-ci égal à l'unité. Dans ces conditions, on a deux relations, l'équation de conjugaison et celle de condition entre quatre quantités, ce qui implique, pour que l'aplanétisme soit réalisé, une relation entre trois quantités, la distance des centres x, le second rayon de courbure y et la distance α de l'objet au premier centre. Si l'on a soin de laisser en évidence la distance α_2 de l'image finale au second centre, on voit que l'on obtient x et y en fonction de α et de α_2 par deux équations unicursales et symétriques, qui permettent de construire un abaque, c'est-à-dire la représentation en plans cotés de la surface qui représente la relation entre x y et α, α_2 servant de variable indépendante. L'abaque ci-joint a été construit de cette façon, le nombre inscrit sur chaque courbe indique la valeur de α pour laquelle il existe un point aplanétique au quatrième ordre près dans la lentille déterminée par l'x et l'y du point correspondant. Les conclusions sont les suivantes :

Les lentilles convergentes minces ont toutes deux points aplanétiques réels (1) très voisins de leurs surfaces. Ils se comportent donc, au point de vue pratique, comme un point double sans changement de signe. Les lentilles divergentes minces n'ont pas en général de points aplanétiques réels, elles en ont deux imaginaires.

(1) Le mot réel est pris dans le sens mathématique et non dans le sens physique.

Il y a exception à ces règles pour les lentilles minces telles que $1.9 > y > \frac{1}{1.9}$ (l'indice $n = 1.55$). Celles-ci ont quatre points aplanétiques si elles sont convergentes, deux si elles sont divergentes. Ces points donnent toujours des images virtuelles.

Pour réaliser pratiquement l'aplanétisme du foyer d'une lentille il faut que l'épaisseur soit d'environ 15 fois le rayon de courbure de la face de sortie. Ceci n'est donc applicable que pour les lentilles puissantes.

Achromatisme. — L'emploi de ces lentilles épaisses nécessite de nouveaux calculs d'achromatisme. Il faut en effet superposer non seulement les foyers mais encore les plans principaux, pour que les distances focales soient égales. Il faut de plus superposer non seulement les premiers, mais encore les seconds foyers, sans cela l'achromatisme n'existera pas. Cette dernière condition est cependant inutile dans le cas de l'oculaire. Dans ce cas il suffit que les deux premières conditions soient réalisées, car l'œil fera converger en un même point de la rétine les rayons de diverses couleurs, pourvu qu'ils soient parallèles. Il suffira dsns ce cas d'un système à deux verres ; pour le premier cas, qui est celui de l'objectif, il faut un système triple.

La discussion du premier cas, qui est le plus simple, montre que toutes les lentilles ne sont pas susceptibles d'être achromatisées, mais que certaines lentilles à foyer aplanétique le sont.

Forme de la surface focale. — Il fallait étudier, après l'aplanétisme et l'achromatisme, la forme de la surface focale conjuguée d'un plan. La définition de celle-ci n'est possible qu'à une condition, c'est que l'homocentricité soit réalisée en dehors de l'axe. Le théorème I du précédent travail sur l'aplanétisme permet de démontrer que cela a lieu pour les plans normaux à l'axe passant par les points aplanétiques. Il s'agit de trouver la condition pour que le rayon de courbure de la surface de révolution conjuguée d'un plan normal à l'axe soit infini. Pour arriver à établir cette condition il faut partir de la définition et des théorèmes suivants :

La transformée optique d'une surface lumineuse par un dioptre est le lieu des points de rebroussement des caustiques relatives à chacun des points de cette surface lumineuse.

Si nous considérons un second dioptre, le faisceau deux fois réfracté, dû aux rayons issus d'un point, n'aura plus de point de rebroussement; mais nous pouvons considérer chacun des points de la première transformée optique comme un point lumineux, et cette surface aura alors une transformée optique, qui est la transformée optique de la première surface relativement aux deux dioptres. Joignons à cette définition le théorème suivant :

Théorème I. — *Deux faisceaux infiniment voisins et parallèles sont réfractés par un dioptre suivant deux rayons formant entre eux un angle du même ordre que la distance des rayons parallèles.*

Nous en conclurons le corollaire suivant : *tout faisceau aberrant faisant avec l'axe un angle infiniment petit sera tel que toutes ses droites passeront à distance infiniment petite du quatrième ordre du point de la transformée optique relative au système centré considéré, correspondant au point lumineux d'où émane le faisceau.*

Si donc le faisceau est homocentrique, ce qui a lieu pour les surfaces normales à l'axe dont le pied sur l'axe est un point aplanétique, la surface focale sera partout à une distance du quatrième ordre de la transformée optique correspondante. Les deux surfaces auront donc même rayon de courbure, et il nous suffira d'étudier les propriétés de la transformation optique relativement à la courbure des surfaces.

La propriété essentielle est exprimée par le théorème suivant :

Théorème II. — *Dans la transformation optique, l'ordre des contacts est conservé.*

On peut donc remplacer une surface de révolution quelconque par sa sphère osculatrice, et il suffit de chercher le rayon de courbure de la transformée d'une sphère par un dioptre. Si nous appelons R ce rayon de courbure, r celui de la sphère lumineuse, γ celui du dioptre, la formule est $\frac{1}{R}=\frac{n}{r}-\frac{n-1}{\gamma}$, ce qui établit la

proposition suivante : *le rayon de courbure de la transformée optique d'une sphère par un dioptre ne dépend pas de la position de la sphère lumineuse sur l'axe du dioptre.*

La recherche du rayon de courbure d'une transformée d'ordre quelconque d'un plan est donc très simple. On a pour un système de lentilles la valeur suivante :

$$\frac{1}{R_{2p}} = \frac{n-1}{n}\left[\left(\frac{1}{\gamma_2}-\frac{1}{\gamma_1}\right)+\left(\frac{1}{\gamma_4}-\frac{1}{\gamma_3}\right)+\ldots\left(\frac{1}{\gamma_{2p}}-\frac{1}{\gamma_{2p-1}}\right)\right]$$

Pour que $R_{2p} = \infty$ il faut donc que la puissance du système supposé comprimé jusqu'à une minceur infinie en gardant ses rayons de courbure et ses indices, soit nulle.

CONCLUSIONS

Les conclusions de tous ces travaux, relatives à l'aplanétisme, à l'achromatisme, à la forme de la surface focale et à l'astigmatisme, ont été vérifiées par un objectif gracieusement construit par M. Baille. Il n'est pas susceptible d'application pratique à cause de l'absorption lumineuse due aux surfaces multiples et aux grandes épaisseurs de verre, et aussi parce qu'il est affecté de distorsion, aberration dont je ne me suis pas occupé jusqu'ici. Cet objectif vérifiant les calculs permet cependant d'espérer le succès quand un constructeur voudra faire les essais certainement coûteux et pénibles de la construction d'un microscope sur ces données.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Sur l'aplanétisme. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 25 janvier 1892.

Sur l'achromatisme. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 1er février 1892.

Aplanétisme et achromatisme. *Société de physique*, février 1892.

Aplanétisme et achromatisme. *Journal de physique*, avril 1892.

Sur la courbure de la surface focale dans les systèmes centrés. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Caen*, 1894.

Sur la courbure de la surface focale dans les systèmes centrés. *Société de physique*, 1er mars 1895.

Sur la courbure de la surface focale dans les systèmes centrés. *Journal de physique*, juin 1895.

§ 2. — Photométrie et photographie.

Ces travaux ont eu pour point de départ des études d'optique physiologique que nous analyserons dans la seconde partie de cet exposé. Les faits principaux qui intéressent la pratique photométrique sont les suivants :

Vision binoculaire et ses conséquences. — Quand on regarde avec les deux yeux une plage présentant des détails délicats, on y perçoit beaucoup plus de détails qu'avec chacun des yeux séparément. L'étude systématique du phénomène montre que si, avec chacun des deux yeux séparément, on perçoit une différence d'intensité entre deux plages pour des différences d'intensités δI_1 et δI_2, on perçoit une différence δI par vision binoculaire quand on a $\frac{1}{\delta I} = \frac{1}{\delta I_1} + \frac{1}{\delta I_2}$. Nous laisserons de côté pour l'instant les conclusions théoriques de ce résultat d'expériences, nous en conclurons seulement qu'un bon photomètre doit comporter la vision binoculaire. L'expérience a d'ailleurs vérifié ce fait dans tous les cas.

Mais si la vision binoculaire est à préconiser pour la sensibilité, elle amène aussi quelques complications, car elle altère quelquefois la précision ; il faut alora employer certains procédés pour éliminer les causes d'erreurs. Nous sommes, en effet, en présence de deux phénomènes qui compliquent les mesures : les diffuseurs ne sont pas parfaits, les deux yeux n'ont pas le même rendement lumineux, c'est-à-dire ne donnent pas la même sensation quand ils sont impressionnés par la même énergie lumineuse. Donc si, pour une certaine position des yeux, l'égalité semble établie entre les deux plages du photomètre, il suffit de déplacer légèrement la tête pour que l'égalité soit troublée. Avec un seul œil le même effet se produit déjà, quoiqu'à un degré moindre. Il n'y a donc pas de relation simple entre les lumières qui donnent l'égalité d'éclairement dans les deux cas. L'appareil n'est plus symétrique, car les deux yeux ne sont pas égaux.

Des mesures faites au moyen d'un photomètre spécial où chaque plage n'était visible qu'avec un seul œil, ont montré que les deux yeux ne donnaient que très rarement la même intensité de sensation. Pour moi, la différence est considérable ; mon œil droit est deux fois et demie plus sensible que le gauche. Dans ces conditions, les erreurs avec un photomètre de Foucault ordinaire, même en fixant la tête par un support mentonnier, peuvent dépasser 30 p. 100.

Pour les éliminer, il faut opérer soit en permutant les sources, soit en employant une source de comparaison fixe et en substituant du même côté du photomètre un étalon à la source à étudier.

Dans le premier cas, un calcul simple montre que si a_1 a_2 sont les deux distances de l'étalon au photomètre, α_1 α_2 les deux distances de la source à mesurer au photomètre, dans les deux parties de l'expérience, on a en appelant x l'intensité de la source, I celle de l'étalon : $x = \mathrm{I}\frac{\alpha_1 \alpha_2}{a_1 a_2}$.

Ces causes d'erreurs peuvent d'ailleurs être évitées presque complètement en opérant la vision binoculaire au moyen d'un système de deux chambres claires amenant aux deux yeux des pinceaux lumineux émis parallèlement à l'axe du photomètre. Si de plus on emploie des photomètres à banc et à incidence normale, les résultats sont excellents.

Avec les instruments à œilleton déjà existants, où la position de l'œil n'est pas parfaitement fixée, comme dans le photomètre Mascart, on élimine complètement les causes d'erreurs dues au défaut de centrage de l'œil en plaçant en arrière des plages à comparer un fil de réticule qui ne sera pas tout à fait au point, mais qui permettra cependant de centrer l'œil sur la ligne de séparation des deux plages.

En somme, un photomètre précis doit réaliser trois conditions :

1° Être disposé pour la vision binoculaire ;

2° Être disposé pour fixer bien nettement la position des yeux observateurs ;

3° Être disposé pour opérer par inversion des sources quand on ne peut opérer par double mesure.

Cette dernièrs condition peut être éliminée par l'emploi des instruments à incidence normale, et munis d'uns double chambre claire comme appareil de visée.

Sensibilité de l'œil. — Un instrument ainsi disposé est parfait pour les comparaisons en lumière monochromatique, mais il n'élimine pas les difficultés relatives à la comparaison des lumières diversement colorécs. Celles-ci sont en effet dues à notre appareil visucl lui-même. Certains auteurs ont préconisé dans ce cas l'emploi de très faibles intensités. La notion de couleur s'efface en effet alors, et la comparaison se fait sans hésitation. Mais l'étude de la courbe de la sensibilité différencielle de l'œil, sur laquelle nous reviendrons à propos de l'optique physiologique, montre que les erreurs dues au défaut de sensibilité par diminution de lumière donnent lieu à des erreurs plus grandes que celles que produisent les différences de couleur des sources usuelles. Peut-être ceci serait-il en défaut pour des yeux adaptés à l'obscurité, comme il semble résulter des travaux de Charpentier, mais ce sont là des conditions impossibles à réaliser dans la pratique.

Photomètre universel. — Ces études ont motivé ma collaboration avec A. Blondel pour la réalisation d'un photomètre pratique. Nous avons fait construire par Pellin un instrument qui permet tous les genres de mesure : celles d'intensité, celles d'éclat d'une surface inaccessible, celles d'éclat d'une source accessible mais de peu d'étendue, celles d'éclairement pour les divers azimuths en un point donné. L'instrument est muni d'œils de chat d'une construction particulière, dont l'idée est due à Blondel, et qui permettent d'avoir la même sensibilité de lecture pour toutes les valeurs de la surface utilisée de la lentille. On peut d'ailleurs employer l'instrument, soit avec les œils de chat, soit directement par la mesure des distances. L'appareil est muni de deux pieds, un pour le laboratoire, l'autre pour l'utilisation à l'extérieur. Les mesures peuvent être faites par un observateur exercé, grâce à tous les détails de lecture et d'observation qui viennent d'être indiqués, à $\frac{1}{150}$ près en lumière bien monochromatique. On ne peut donner de

chiffres pour lca comparaisons en lumière hétérochrome. L'étalon que nous employons en ce moment a été étudié par Blondel. Il est dérivé de l'étalon Heffner ; le combnstible employé est un mélange d'alcool et de benzine. Nous attendons des études plus complètes pour employer l'étalon à acétyléne.

Étalon lumineux. — Une antre source de lumière m'a semblé utilisable comme étalon dans certains cas, c'est la lampe à la naphtaline. Celle-ci nécessitant l'emploi du gaz ne nous a pas semhlé pratique comme étalon transportable, mais elle a été utilisée par MM. Gautier et Hélier dans leurs études sur la combinaison du cblore et de l'hydrogène. A condition de maintenir la température extérieure fixe à 5 ou 6 degrés près, les erreurs ne sont pas de plus de 2 à 3 p. 100. La lumiére est tout à fait blanche, très actinique. C'est donc l'étalon à recommander pour les essais photographiques. Je n'ai en effet jamais observé l'obturation des becs par des particules de charhon, ce qui se produit avec l'acétyléne.

Rapport sur la photométrie — J'ai été chargé en 1895-1896, par l'Association française pour l'avancement des sciences, d'un rapport sur la photométrie, question mise à l'étude par la section de physique. Ce rapport a donné lieu à des communications de MM. Charpentier, Macé de Lépinay et Nicati, Guillaume, Violle, Chassevant, Crova, Blondel, de la Baume-Pluvinel, Féry. Le rapport et les communications ont été réunis en une brochure séparée, annexée aux travaux du Congrès de Carthage. Je n'ai pas à analyser ces travaux ici.

Sensibilité de la plaque photographique. — J'arrive maintenant à quelquea résultats sur la sensihilité de la plaque photographique. Il n'y a aucune relation connue entre le temps de pose, la lumière et l'impression. Si, pour les lumières moyennes il y a proportionnalité, il n'en est pas de même pour les intensités basses. Les résultats dépendent plus encore qu'on ne le croit de la nature des radiations. Le rouge par exemple, qui, à hasse inten-

sité, ne donne aucune impression, peut donner des impressions considérables à haute intensité, surtout s'il agit en même temps qu'une faible lumière plus actinique. De plus, deux plaques pour lesquelles les minima de lumière compatibles avec l'impression sont dans un certain ordre, donnent fréquemment, pour les impressions produites en un temps court et à forte lumière, un ordre différent. Il ne faut donc pas se fier aux sensibilités indiquées sur les boîtes de plaques, et qui sont données par le sensitomètre de Warnecke, car ces chiffres ne se rapportent qu'au minimum d'impression. La photométrie photographique est donc tout entière à créer, et ce n'est pas probablement par la plaque photographique qu'on arrivera à résoudre ces problèmes, mais par des réactions analogues à celles qu'a étudiées M. G. Lemoine sur les mélanges d'acide oxalique et de chlorure ferrique.

Distinction des plages par la photographie. — J'ai enfin montré que l'existence d'un minimum au-dessous duquel la plaque photographique n'est pas impressionnée suffit à prouver, quelle que soit la fonction qui relie l'intensité lumineuse, l'intensité d'impression photographique et le temps de pose, que, lorsque l'intensité lumineuse sera suffisamment faible et le temps de pose suffisamment long, le contraste entre deux plages pourra devenir aussi grand qu'on le voudra.

En effet, soit I l'impression photographique, E l'éclairement, E' le minimum d'impression, nous avons $I = f(E - E', t)$ la fonction f s'annulant pour $E = E'$. L'impression une fois faite, ce qui nous importe pour la perception d'une différence entre deux plages dont les éclairements étaient E et $E + dE$, c'est le rapport $\frac{dI}{I}$, fraction de Bouguer Masson. Nous avons $\frac{dI}{I} = \frac{f'_E}{f} dE$ puisque le temps de pose est le même pour les deux plages. Or f s'annule pour la valeur $E - E'$. $\frac{dI}{I}$ ne s'annulera pas, car l'expérience prouve que, très près du minimum d'impression, la fonction f croît très vite, donc que f'_E a une valeur notable.

Si nous avons insisté sur ce calcul très simple, c'est qu'il donne l'explication de la découverte des étoiles photographiques, d'un

éclat insuffisant pour être vues à l'œil nu, mais suffisant pour impressionner la plaque.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Études physiologiques, physiques et cliniques sur la vision des éruptions cutanées. Thèse pour le doctorat en médecine, Paris, 1893.

Sur les sensations visuelles et la photométrie. *Société de physique*, 2 février 1894.

Sur les sensations visuelles et la photométrie. *Journal de physique*, mai 1894.

Traduction en anglais de cet article dans *The Electrician*, de Londres.

Sur la sensibilité de la plaque photographique. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Bordeaux*, 1895.

Rapport sur la photométrie. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Carthage*, 1896.

Sur quelques conditions à réaliser en photométrie. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Carthage*, 1896.

Sur l'emploi de la lampe à l'albo-carbon comme étalon lumineux. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Carthage*, 1896.

Photomètre universel (En collaboration avec A. Blondel). *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Carthage*, 1896.

Photomètre universel (Avec A. Blondel). *L'Éclairage électrique*, 23 janvier 1897.

Revue générale des sciences, 1894. Correspondance, p. 310.

§ 3. — Électricité.

TECHNIQUE ÉLECTRIQUE

Mesure des résistances électrolytiques. — J'ai montré par un calcul simple comment le seul emploi de deux déterminations différentes avec deux intensités différentes dans la méthode du pont de Wheatstone permettait d'éliminer les forces électromotrices, soit actives, soit de polarisation dans la mesure des résistances. Il suffit pour cela de connaître le rapport des deux intensités avec lesquelles les deux mesures ont été faites. L'emploi

de cette méthode pourrait permettre de séparer nettement les effets de la résistance elle-même de ceux de la polarisation dans les tissus vivants. La présence du galvanomètre qui donne le rapport des intensités permet d'ailleurs de savoir quelle intensité passe dans les tissus en expérience. Comme leur résistance dépend et de l'intensité et du temps pendant lequel elle a agi, c'est une donnée indispensable.

Galvanomètre à spirale. — Cette méthode exige l'emploi d'un galvanomètre donnant avec précision le rapport de deux intensités et assez sensible pour présenter de grandes élongations avec les faibles courants qu'il faut employer pour ces mesures. J'ai réalisé cet instrument en perfectionnant une idée d'Ayrton et Perry déjà modifiée par MM. Chauvin et Arnoux. Le cadre d'un galvanomètre Deprez d'Arsonval est suspendu par un ressort en lame d'argent de 0,1 millim. d'épaisseur sur 0,3 millim. de large. Dans ces conditions le couple de torsion est faible par rapport à la force portante, il peut y avoir malgré le poids du cadre un grand nombre de spires dans la hauteur de suspension disponible ; la déformation de chaque spire pour une torsion donnée est donc faible et le métal est toujours très loin de la déformation permanente. Le retour au zéro se fait d'une manière tout à fait parfaite à cause de cela. On peut avec cet instrument employer la méthode de lecture de M. d'Arsonval avec micromètre et microscope. Dans ces conditions un instrument à double fer à cheval permet de faire des mesures thermo-électriques à 0°,01 près, en employant une seule soudure nickel laiton. Il a été employé ainsi par MM. Athanasiu et Carvallo dans leurs études sur l'injection d'eau chaude dans les vaisseaux.

Galvanomètre astatique. — Un autre procédé m'a permis de réaliser un galvanomètre de haute sensibilité et très indépendant du champ terrestre. Modifiant une idée de Gray et Pierre Weiss, qui ont employé dans le galvanomètre Thomson des équipages à aiguilles verticales, j'ai donné à celles-ci un point conséquent en leur milieu. De la sorte chacune d'elles est presque indépendante

d'un champ uniforme même quand elle est horizontale. Quand elle est verticale le couple résiduel devient du second ordre. Le système est indépendant d'un champ même uniformément varié. Cet équipage ayant trois couples de pôlea peut être utilisé avec une, deux ou trois paires de bobines. Un calcul assez simple permet de voir que la sensibilité maxima sera réalisée par une seule paire de bobines. Cette aolution est en même tempa la plus facile à construire. L'instrument a été fait par M. Torchebœuf. Les équipagea ont été construits par moi avec des morceaux d'aiguilles d'acier à injections sous-cutanées, et la constante de l'instrument muni de bobines de 3 centim. de diamètre est de 350. Les instruments ordinaires du modèle Thomson atteignent difficilement la constante 100.

De beaucoup plus fortes constantes ont été réaliséea par M. Paschen, mais au prix d'une construction d'équipage extrêmement délicate et précaire. Mon instrument est en ce moment au Bureau international des poids et mesures, où M. Harker l'emploie à des recherches bolométriques, après avoir essayé tous les autres types d'équipages.

ÉLECTRICITÉ THÉORIQUE

Propriétés de l'étincelle électrique. — J'arrive maintenant à la partie de mes travaux qui se rapporte à l'électricité théorique. Je me suis occupé des propriétés que prend un circuit lorsqu'une étincelle y jaillit. Le résultat de ce travail peut s'énoncer ainai : L'étincelle est l'origine d'oscillations de haute fréquence qui se propagent le long des conducteurs, en s'amortissant d'autant plus que l'on s'éloigne plus de l'étincelle. La première observation qui m'a conduit à étudier ces phénomènes est la suivante : Si on met un tube à vide en communication unipolaire avec un des pôles d'une bobine d'induction, au moment où l'étincelle jaillit, l'illumination du tube augmente. Si on prend un tube aans électrodes, à acide carbonique, gros et long, on voit que, lorsque l'étincelle ne jaillit pas, l'illumination s'arrête à une certaine distance dans le

tube. Lorsque l'étincelle jaillit au contraire, le tube devient lumineux tout entier. Ceci, d'après les idées généralement reçues, indique que le potentiel maximum à l'origine du tube est devenu plus élevé.

Si on complète cette étude par des mesures électrométriques faites par la méthode idiostatique, on s'aperçoit que le carré moyen du potentiel diminue lorsque l'étincelle jaillit. L'ensemble de ces deux résultats implique qu'une partie de l'énergie est transformée, lorsque l'étincelle jaillit, en oscillations plus amples, plus fréquentes et plus amorties que celles qui naissent dans la bobine eous l'influcnce de eon inducteur.

Avec une machine statique, les résultats sont analoguee.

J'ai montré que ces phénomènes étaient dus à l'étincelle nettement disruptive. Si on rapproche assez les boules pour qu'un arc jaillisse, ile disparaissent. Ils réapparaissent dès que l'étincelle franche se produit, soit qu'on souffle l'arc, soit qu'on diminue le nombre des accumulateurs employée, ce qui diminue l'énergie et remplace l'arc par une étincelle nette. L'expérience peut être rendue trèe nette; on peut régler l'excitation de manière à avoir la même indication électrométrique pour un arc et pour une étincelle nettement disruptive. Dans le premier cae, le tube n'est le siège d'aucun phénomène particulier, dane le second, il donne les effets déjà décrits. Si de plus, l'arc jaillissant, on interpoee un carton, à chaque trou percé dans celui-ci par la décharge, on verra dane les tubes les illuminations caractéristiquee de l'étincelle. Les diélectriques sueceptibles de fondre ne donnent au contraire aucun effet.

En employant une bobine d'induction à quatre segments dont lee points de réunion sont accessibles, j'ai pu voir que les effets décrits ci-dessus s'affaiblissaient d'autant plus qu'on s'éloignait davantage de l'étincelle. L'expérience réuseit aussi bien avec la bobine d'induction qu'avec la machine statique. Dans ce dernier cas, cependant, elle est plus facile à interpréter, lee phénomènes étant plus simples.

Dans les expériences suivantes, j'ai montré que ces oscillatione

à potentiel et à fréquence élevés étaient probablement de l'ordre de fréquence des oscillations du tertiaire de Teslà. En effet, quand on entoure l'étincelle d'un écran de carton opaque, on voit les fils conducteurs reliés unipolairement avec l'excitateur couverts d'aigrettes sur toute leur longueur. Ces aigrettes peuvent atteindre 8 centim. de diamètre. Elles semblent correspondre à des nœuds uniformément répartis le long des fils. Leur aspect est tout à fait celui des aigrettes qui couvrent les fils mis en communication avec le transformateur à huile de Teslà. En plaçant un fil long de 35 mètres, entre deux étincelles, j'ai vu les aigrettes le couvrir, et en même temps j'ai pu le prendre à la main sans éprouver de commotion, quoique la bobine donnât 45 centim. d'étincelle. D'ailleurs un long et gros tube à acide carbonique sans électrodes, tenu de l'autre main, devenait lumineux.

Un fait à noter est que les aigrettes changent d'aspect suivant le diélectrique où jaillit l'étincelle. Quand l'étincelle jaillit dans l'air, les aigrettes sont moins serrées que quand elle jaillit dans le pétrole; et quand elle jaillit en perçant du carton, les aigrettes se transforment en de véritables langues de feu courtes et serrées. Si on considère les aigrettes comme marquant les ventres d'une onde stationnaire, on voit que la période correspondante est dans le premier cas de l'ordre de 10^{-10}, dans le second de celui de $\frac{10^{-10}}{2}$ dans le troisième de $\frac{10^{-10}}{4}$.

Nous voyons donc que l'étincelle ne joue pas simplement le rôle d'un conducteur, comme on le pense trop souvent. C'est un lieu de transformation d'énergie, où prennent naissance des oscillations de très haute fréquence.

Enfin j'ai montré qu'avec deux pointes de platine rapprochées de $1^{mm},5$, dans un tube à vide, résistant complètement à 9 centim. d'étincelle, on pouvait voir une étincelle jaillir dans le vide entre les deux pointes, montrant ainsi que l'éther même peut avoir un rôle dans les phénomènes de rupture des diélectriques.

Polarité de la bobine. — Ces études m'ont amené à étudier les propriétés des deux pôles de la bobine de Ruhmkorff; j'ai combiné

alors une expérience facile à répéter dans les cours pour montrer l'existence dans le secondaire d'une bobine des ondulations amorties de Mouton. Il suffit pour montrer ce fait de prendre un tube de Crookes en communication unipolaire avec un des pôles de la bobine, qui fonctionne alors à circuit ouvert. On voit que le tube fonctionne aux deux pôles, mais moins au positif qu'au négatif. Ceci montre immédiatement que le secondaire ouvert est le siège d'oscillations, puisque le pôle positif devient aussi négatif, et qu'elles sont amorties puisque l'effet de l'ensemble des oscillations négatives du pôle positif est moindre que celui de l'ensemble des oscillations négatives du pôle négatif.

Théorie des champs de force. — J'ai été ensuite amené par d'autres études à m'occuper des bases mathématiques des théories électriques. M. Vaschy a démontré en 1894 le théorème suivant: on peut rendre compte de l'existence d'un champ de force quelconque défini par ses composantes X Y Z au moyen de deux espèces de masses. Les unes agissent de la même manière dans toutes les directions et ont les densités qu'on attribue aux masses électrostatiques en fonction de X Y Z et de leurs dérivés ; les autres sont des masses vectorielles qui sont localisées aux points où il n'y a pas de potentiel et qui agissent comme des éléments de courant électrique suivant la loi de Laplace. Elles ont pour valeur en fonction des dérivées de la force l'expression que Maxwell a indiquée pour l'intensité du courant.

L'existence de pareilles masses implique l'existence de régions où il n'y a pas de potentiel. Il faut donc qu'il y ait dans le champ une source d'énergie transformable mise en jeu pour l'entretenir. Il y a donc trois espèces de points dans le champ. Dans les premiers il y a soit production, soit absorption d'énergie en régime permanent; dans les seconds il y a de l'énergie transmise et non absorbée, dans les troisièmes il n'y a pas transmission d'énergie. Ce qui distingue ces points l'un de l'autre, ce sont donc les propriétés du flux d'énergie. Dans les premiers il n'est pas conservatif, dans les seconds il est conservatif, dans les troisièmes il n'existe pas.

j'appelle E le vecteur flux d'énergie. En m'appuyant uniquement sur le principe de la conservation de l'énergie j'ai démontré le théorème suivant:

Théorème I. — *Dans le régime permanent, aux points où il n'y a pas transformation d'énergie, le vecteur E est réversible; il est irréversible aux points où il y a transformation d'énergie.*

Par des considérations simples relatives à l'ellipsoïde de variation d'un vecteur autour d'un point j'ai démontré :

Théorème II. — *La condition nécessaire et suffisante pour qu'une force dans une région dérive d'un potentiel est que les axes de l'ellipsoïde de variation de cette force autour de chaque point de cette région coïncident avec les directions auxquelles ils correspondent.*

Or cette coïncidence caractérise l'état d'un milieu appelé l'égalité symétrique, dans lequel il n'y a pas de direction sur laquelle les deux sens ne soient pas indifférents. Cette notion a été établie par Duhamel et employée par Lamé et Mallard. Elle suffit à démontrer :

Théorème III. — *La condition nécessaire et suffisante pour qu'une force dans une région ne dérive pas d'un potentiel est qu'il y ait en chaque point de cette région transformation d'énergie ou régime variable.*

Nous voyons donc que, quelle que soit la nature de l'énergie mise en jeu dans une transmission d'énergie, si dans une région il y a transformation d'énergie, on rendra compte de l'existence du champ de force grâce auquel l'énergie se transmet par l'existence en cette région d'une quantité identique au point de vue mathématique à l'intensité du courant électrique. Les seules lois particulières à l'énergie électrique sont donc la loi de Joule et la loi de Ohm. La loi de Laplace est la conséquence du fait que les conducteurs chauffent, la loi particulière qui relie le vecteur intensité à la transformation d'énergie n'y entre pour rien, pas plus que la loi de Ohm.

Je n'ai pas encore eu le temps de tirer toutes les conclusions

que comporte ce théorème. Il ouvre certainement un champ nouveau à l'esprit dans tous les phénomènes où il y a transmission d'énergie avec transformation en certaines régions. Qu'il me soit permis de mentionner parmi ces derniers phénomènes la contraction musculaire et la transmission nerveuse.

Nous verrons tout à l'heure l'application de ceci à la polarisation rotatoire.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Etudes expérimentales sur l'étincelle disruptive. *Société de physique*, 19 juillet 1895.

Études expérimentales sur l'étincelle disruptive. *L'Éclairage électrique*, 24 et 31 août 1895.

Sur l'élimination des forces électromotrices dans la mesure des résistances. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Bordeaux*, 1895.

Sur la polarité de la bobine de Ruhmkorff. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Bordeaux*, 1895.

Galvanomètre absolument astatique et à grande sensibilité. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 13 juillet 1896.

Galvanomètre absolument astatique et à grande sensibilité. *Société de physique*, 17 juillet 1896.

Galvanomètre absolument astatique et à grande sensibilité. *Journal de physique*, février 1897.

Sur la transmission d'énergie à distance. Application à la polarisation rotatoire. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 15 novembre 1897.

§ 4. — Électro-optique. Tubes à vide et rayons X.

Je n'ai pas d'expériences personnelles sur les rayons X, mais j'ai été amené à m'occuper de la question. Lors de la publication de la découverte de Röntgen, j'ai soutenu devant la Société physique et dans la Revue scientifique que les nouveaux rayons n'étaient autres que ceux qui avaient été déjà vus par Lénard. Cette manière de voir a soulevé des discussions assez ardentes, qui me semblent avoir été jugées par l'Institut, lorsqu'il a décerné à

Lénard le prix La Caze de physique, et à Röntgen celui de physiologie.

J'ai ensuite insisté, à propos de l'épilation par les rayons X, sur ce fait que l'épilation ne se produit que quand il y a formation d'une véritable eschare. Le follicule pileux n'est détruit qu'avec la peau.

Sur la transversalité des perturbations électro-magnétiques. — Dans une conférence au groupe parisien des anciens élèves de l'École polytechnique, j'ai été amené à exposer de nouveau cette question et à montrer pour quelles raisons les rayons X semblent actuellement devoir se rattacher au spectre solaire.

Ayant pris cette question du spectre sous son aspect le plus général, j'ai été amené à parler des expériences de Hertz de la théorie électro-magnétique de la lumière, et à exposer à ce sujet une idée que je crois neuve. Maxwell ayant obtenu une expression mathématique des lois de l'induction, introduit une hypothèse impliquant l'incompressibilité du milieu qui transmet les actions électriques, c'est-à-dire la transversalité des mouvements. Il y a une vérification expérimentale de cette hypothèse, à mon avis, dans les expériences de Blondlot (*C. R.*, 1893) sur la vitesse de propagation des perturbations électro-magnétiques le long des fils. Dans ces expériences, deux étincelles jaillissent à la même coupure, l'une lors de la décharge d'une bouteille de Leyde, l'autre lorsque la perturbation due à cette décharge a parcouru le long d'un fil une certaine distance. Dans les expériences, cette seconde étincelle est unique. Or, la théorie de l'élasticité nous apprend que, pour que les perturbations transversales et longitudinales aient même vitesse de propagation, il faut que l'énergie due à la perturbation soit indépendante de la dilatation, ce qui semble difficilement admissible. La vitesse mesurée est celle qui est calculée d'autre part pour les perturbations transversales ; il semble donc bien démontré expérimentalement que les perturbations électriques sont purement transversales.

Polarisation rotatoire. — J'arrive maintenant à mes travaux

relatifs à la polarisation rotatoire. Zeeman a montré qu'un changement de période se produit dans l'émission lumineuse d'une source placée dans un champ magnétique. Faraday avait essayé le phénomène, et Tait avait montré que quand la lumière se propage dans un milieu doué de pouvoir rotatoire magnétique, aucune variation ne se produit. On pouvait se demander si la variation de période était absolument nulle, ou bien seulement infiniment petite par rapport à la rotation du plan de polarisation. Je me suis alors adressé à un corps dont le pouvoir rotatoire est d'un autre ordre que celui des autres corps, le fer. Une couche électrolytique de 0,01 environ donne une rotation de 30′ environ dans un champ d'à peu près 15,000 C. G. S. Dans ces conditions, en employant un réseau de Rowland, il est impossible de voir la moindre trace de variation de période.

Les théorèmes précédents sur les champs de force permettaient d'ailleurs de prévoir l'impossibilité du changement de période, autrement que dans le cas d'une forte absorption. En effet, le champ magnétique jouit de l'égalité symétrique, ainsi que le rayon lumineux non absorbé; car tous deux sont réversibles, donc la superposition des deux ne peut donner lieu à une transformation d'énergie, ce qui serait exigé par un changement de période.

Décharge électrique dans le champ magnétique. — Ayant continué à m'occuper du phénomène de Zeeman, j'ai cherché à vérifier la théorie mathématique que Lorentz et Zeeman en ont donnée. D'après cette théorie, les phénomènes sont dus à ce que, dans la flamme, les molécules sont scindées en *ions*, c'est-à-dire en éléments doués de propriétés électriques. Les équations du mouvement dans le champ magnétique montrent alors qu il y a trois trajectoires stables, une parallèle aux lignes do force, les deux autres circulaires en sens inverses autour de celles-ci. L'existence des ions dans la flamme semble démontrée par la décharge des corps électrisés, et la suppression de cette propriété lors du passage des gaz dans un ozoniseur ou sur un conducteur chargé (Villari).

D'un autre côté, dana les idéea de Crookes, les décharges électriques dans les gaz raréfiés sont duea à des tranports d'ions ; la seule différence avec la flamme, est donc que, dans ce dernier cas, les mouvements sont vibratoirea à cause de l'élasticité du milieu, au lieu que dans le tube à vide les molécules ont des trajectoires finies.

J'ai vu que, dans le tube de Crookes, une cathode sphérique placée dans un champ magnétique émet deux sortes de rayons, les rayons de première espèce, qui sont la limite des rayons ordinaires, et qui s'enroulent autour du champ, et les rayons de seconde eapèce qui naissent brusquement pour une certaine valeur du champ magnétique, et sont parallèles au champ. Ceux-ci avaient été vus déjà par M. Birkeland, qui ne les avait pas distingués des premiera.

Avec les tubes de Geissler, on voit la décharge soua l'action du champ ae séparer en deux, une portion émanée de la cathode, parallèle au champ magnétique, et une portion émanée de l'anode, normale au champ. Enfin, avec l'arc électrique formé par une bobine d'induction, on peut voir la surface de vis formée en général dans le champ magnétique ae transformer en donnant deux fuseaux parallèles au champ issus des deux électrodes, et une surface normale au champ située au milieu de la diatance des deux électrodes.

Le fait que les molécules qui transportent la décharge se séparent toujours en deux parties, l'une qui suit le champ, l'autre qui s'enroule autour du champ, est donc absolument général et semble apporter un appui expérimental sérieux à la théorie de Lorentz et Zeeman des phénomènes découverts par ce dernier.

Il semble ausai qu'on peut penser que la seule différence entre une source lumineuse gazeuse et un tube à vide provient de l'absence d'élasticité du milieu dans ce dernier cas.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

La photographie à travers les corps opaques. A propos des rayons de Röntgen. *Revue scientifique*, février 1896.

Les rayons de Röntgen et les rayons Lénard. *Société de physique*, 7 février 1896.

Le spectre solaire et ce qui semble devoir s'y rattacher. Conférence faite au groupe parisien des anciens élèves de l'École Polytechnique, juin 1896.

Le spectre solaire et ce qui semble devoir s'y rattacher. *Revue scientifique*, juin 1896.

Sur l'épilation par les rayons X. *Société de physique*, 4 décembre 1896.

Sur le mécanisme de la polarisation rotatoire magnétique. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 8 novembre 1897.

Sur le mécanisme de la polarisation rotatoire magnétique. *Société de physique*, novembre 1897.

Sur le mécanisme de la polarisation rotatoire magnétique. *Journal de physique*, décembre 1897.

Sur la transmission d'énergie à distance. Application à la polarisation rotatoire. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 15 novembre 1897. Travail déjà mentionné au paragraphe précédent.

Les variations de période des raies spectrales. *Revue générale des sciences*, 15 décembre 1897.

Quelques propriétés des cathodes placées dans le champ magnétique. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 7 mars 1898.

Quelques propriétés des décharges électriques produites dans un champ magnétique. Assimilation au phénomène Zeeman. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, 14 mars 1898.

Décharges électriques dans le champ magnétique. *Société de physique*, 18 mars 1898.

§ 5. — **Isolement des instruments.**

Dans les recherches précédentes, j'ai eu à me préoccuper à plusieurs reprises de me mettre à l'abri des vibrations du sol. J'ai été obligé, pour le galvanomètre, de recourir à la suspension élastique préconisée par MM. Hamy et Julius, ayant observé que l'isolement de l'appareil sur caoutchouc donnait les plus mauvais résultats. Le caoutchouc absorbe cependant en partie l'énergie des vibrations qui lui sont transmises. L'étude au bain de mercure m'a montré que les oscillations dues à une cause déterminée diminuaient d'amplitude, mais augmentaient de période quand le bain était placé sur un lourd support isolé par des caoutchoucs. Si donc

l'appareil isolé comprend un équipage doué d'une période d'oscillation propre, il peut se faire que l'augmentation d'amplitude due au rapprochement des deux périodes synchronisée et synchronisante soit plus forte que la diminution due à l'absorption d'énergie. Si, au contraire, il n'y a pas dans l'appareil de partie à oscillation propre lente, les caoutchoucs ne peuvent avoir qu'un bon effet. C'est ce que j'ai observé pour les pointés de raies spectrales avec le réseau de Rowland, faites à 3 mètres de l'appareil. Dans ce cas, la moindre vibration du sol rend tout pointé impossible. Au contraire, en isolant sur cales de caoutchouc la lourde table qui porte le réseau, les pointés ont été rendus excellents.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Isolement des appareils contre les trépidations du sol. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Saint-Étienne*, 1897.

Isolement des appareils contre les trépidations du sol. *Société de physique*, janvier 1898.

DEUXIÈME PARTIE

PHYSIQUE BIOLOGIQUE ET PHYSIOLOGIE

§ 1. — Optique physiologique.

Loi de Fechner. — Quand on veut déduire de l'expérience une relation entre la grandeur de l'excitation et celle de la sensation, il faut faire une hypothèse. L'expérience ne nous donne en effet qu'une relation différentielle, celle qui existe entre l'éclairement total I et la plus petite différence dI d'éclairement perceptible entre deux plages. Il est aisé de voir que, suivant l'hypothèse qu'on fait sur l'accroissement de sensation correspondant, on peut trouver toute forme de loi arbitraire, donnée d'avance. Mais il est rationnel de définir la sensation par la constance de l'accroissement de sensation donnant la perception d'une différence. C'est l'hypothèse de Fechner. Dans ces conditions, en admettant la constance de $\frac{dI}{I}$ on trouve la loi de Fechner $S = A \log. I + S_0$.

Sensibilité binoculaire. — J'ai cherché à vérifier l'hypothèse de Fechner. Pour cela, j'ai observé par vision binoculaire, puis monoculaire, un disque tournant à trait noir interrompu de Masson. Dans ces conditions, le rapport de l'intensité de la couronne d'ordre p au fond blanc est inversement proportionnel à p. J'ai établi la loi expérimentale suivante : Si avec un œil on voit la couronne d'ordre p et avec l'autre la couronne d'ordre n, avec les deux yeux, on voit la couronne d'ordre $n + p$. Or $dI_1 = \frac{K}{p}$, $dI_2 = \frac{K}{n}$, $dI = \frac{K}{n+p}$ en appelant dI_1, dI_2, dI les accroissements d'intensité entre la dernière couronne perceptible et la voisine, d'où $\frac{1}{dI_1} + \frac{1}{dI_2} = \frac{1}{dI}$.

Il est naturel de nommer le rapport $\frac{1}{dI}$, la sensibilité de l'œil, on peut donc énoncer cette loi absolue : *La sensibilité binoculaire est la somme des sensibilités monoculaires.*

Cette expérience étant posée, on peut diriger le raisonnement de deux façons différentes. Ou bien on admet que les sensations dues aux deux yeux s'ajoutent, et alors un calcul simple montre que l'hypothèse de Fechner en est la conséquence, ou bien on admet l'hypothèse de Fechner, et on voit que l'addition simple des sensations dues aux deux yeux en est la conséquence.

L'hypothèse de Fechner semble déjà bien prouvée par les mesures astrophotométriques de Herschell et Steinheil. L'addition simple des sensations binoculaires est probable aussi individuellement. Fechner savait déjà, en effet, que, quand on regarde une surface éclairée monoculairement puis binoculairement, la sensation dans le second cas est plus grande que dans le premier. Je n'ai pu encore réussir de mesures directes, d'autres études m'ayant empêché de faire les longs et pénibles exercices nécessaires pour être maître de ne pas neutraliser l'image due à mon œil gauche. Celui-ci me donne, comme je l'ai déjà indiqué, des sensations beaucoup moins intenses que le droit, et je suis habitué à neutraliser ses sensations quand elles ne sont pas identiques à celles de l'œil droit. Malgré cela, les deux hypothèses, addition simple des sensations et hypothèse de Fechner sont probables séparément et s'impliquent l'une l'autre. Leur ensemble a donc un haut degré de probabilité.

Cause de la loi de Fechner. — Rendement de l'œil. — Les sensations venues d'un œil se rendent aux deux circonvolutions occipitales, au moins pour le point de fixation. Si donc les sensations dues aux deux yeux s'ajoutent, c'est que la cause de la diminution de rendement exprimée par la loi de Fechner se trouve non dans la perception de la sensation, mais dans la production de cette sensation elle-même. Nous devons, dans cette manière de voir, considérer que la cause de cette diminution de rendement est dans l'œil lui-même. Nous savons que deux phénomènes diminuent

l'énergie utilisable par unité de surface de la rétine quand l'intensité augmente, c'est la constriction pupillaire et la migration du pigment rétinien, qui diminue la surface occupée par les éléments sensibles, et offre à la lumière une surface noire où son énergie se transforme en chaleur.

Dans ces idées, on ne peut avoir de loi nette pour la sensibilité de l'œil que si on définit absolument son état. Il y a deux procédés : ou bien de prendre l'œil adapté complètement à la lumière employée par une contemplation de quelques instants, ou bien de prendre une observation rapide pour un œil adapté à l'obscurité complète par un long repos. Cette dernière méthode a été employée par Charpentier, qui a vu alors que la différence perçue par l'œil était indépendante de l'intensité ou à peu près. Cette expérience milite donc en faveur de l'idée que je soutiens : *La cause de la loi de Fechner, c'est-à-dire de la diminution du rendement de l'œil quand l'intensité augmente, est purement physique, elle est due aux réflexes de défense de l'œil pour éviter le traumatisme par une lumière trop violente.*

Images accidentelles sur fond obscur. — Dans cette manière de voir, c'est la composition du sang qui baigne la membrane de Jacob qui doit régler les réflexes de défense ; la constriction pupillaire et la migration du pigment doivent se produire jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la destruction par la lumière et la reconstitution par le sang. Dans ce cas nous devons constater, pour les intensités un peu grandes, une composition constante du sang de la membrane de Jacob. L'analyse de ce sang est impossible, mais j'ai pensé que certains phénomènes pouvaient nous donner une idée de sa composition précisément par rapport aux éléments utiles pour la reconstitution de la rétine. Ces phénomènes sont les images consécutives sur champ obscur.

Helmholtz donne une description de ces phénomènes assez complète à certains points de vue, mais inexacte quant à la description des phases du début. Cette inexactitude tient à l'imperfection des appareils dont il pouvait disposer à l'époque où il s'est

occupé de ces phénomènes. Ces images, même quand elles sont bien développées, disparaissent en effet dès qu'un mouvement un peu notable du corps est fait. Pour l'observation Helmholtz fermait les yeux et plaçait les mains dessus, puis, après adaptation à l'obscurité, ouvrait les yeux et les mains, puis les refermait. Dans ces conditions, on ne peut commencer à observer qu'après disparition du trouble dû au mouvement des mains et des paupières. Aussi décrit-il les phénomènes comme une persistance des impressions lumineuses sur la rétine. Mais actuellement, nous avons à notre disposition des obturateurs photographiques dont on peut régler à volonté la vitesse et qui se déclanchent par une faible pression de l'index sur une poire en caoutchouc. En employant ces instruments, j'ai pu étudier en détail la période de début de ces images, qui m'a montré l'impossibilité de la théorie d'Helmholtz, et la probabilité de mes idées sur la loi de Fechner.

Dans ces conditions, on voit en effet nettement les faits suivants :

Quand l'impression est forte, il y a obscurité complète 4" environ après la clôture de l'obturateur, puis l'image subjective apparaît, et atteint son maximum en 15". Ceci a lieu pour une source intense avec impression instantanée, ou avec une source moins puissante, si la pose a été assez longue. La durée de l'image consécutive dépend de la grandeur de l'impression. En regardant le soleil pendant 4", j'ai observé une image encore intense au bout de 12 heures, et même une image encore nette après 24 heures.

Quand l'impression est moins grande, le temps d'obscurité diminue pour devenir nul quand l'impression est assez faible. Mais, même dans ce cas, on voit très nettement que la sensation croît au début.

Ces images sont tout à fait parallèles avec les images accidentelles sur fond clair, qui sont liées d'une manière évidente à la fatigue.

Tous ces faits se coordonnent parfaitement si on admet que les images consécutives sont dues à la réparation de la fatigue causée par la lumière. Dans ces conditions, le sang a besoin d'être renouvelé pour que l'image apparaisse avec son maximum. La période

fixe de 4" avant l'apparition de l'image montre que pour les impressions assez fortes, la composition du sang devient invariable, ce qui est conforme aux idées précédentes relatives au rendement de l'œil. La période de 15" indique le temps qu'il faut pour le renouvellement complet du sang de la membrane de Jacob.

Une observation clinique est venue mettre ces idées hors de doute. M. le docteur Gros, ophtalmologiste, à la suite d'un traumatisme de l'œil, a un scotome du champ visuel. L'examen ophtalmoscopique montre une zone correspondante anémique sur la rétine. Le lendemain, la tache anémique a disparu, le scotome persiste, mais il est remplacé par une sensation lumineuse subjective tout le temps que l'œil est dans l'obscurité. Celle-ci a duré un peu plus longtemps que le scotome, ce qui est facile à comprendre, car un scotome n'est perçu que s'il est très fort.

Ainsi, dans cette observation, tant que le sang n'a pas baigné la partie lésée, scotome sans image subjective sur fond obscur. Aussitôt que l'anémie a cessé, scotome accompagné d'image subjective sur fond obscur. Celle-ci est évidemment liée à la reconstitution de la partie lésée de la rétine.

Étude expérimentale de la sensibilité différentielle. — Pour compléter ces études, il fallait chercher la loi qui relie la fraction différentielle $\frac{\delta I}{I}$ à l'intensité I. La méthode employée a été celle du disque de Masson, et la courbe trouvée une hyperbole exacte (fig. 3), obtenue avec de nombreuses vérifications. Le maximum de sensibilité a été trouvé encore égal à 1 Carcel mètre, comme par les autres méthodes. En appliquant l'hypothèse de Fechner, rendue bien probable par la discussion précédente, à la fonction ainsi mesurée pour mes yeux, j'ai pour la loi qui relie la sensation à l'excitation : $S = A \; log. \frac{I + 12,65}{I + 45} + S_0$ car j'ai trouvé $-0,0125 I^2 + 0,0333 I \left(\frac{\delta I}{I}\right) - 0,43 I = 1$, d'où $dS = A \frac{dI}{0,0125 I^2 + 0,43 I + 1}$

Les constantes A et S_0 exigeraient pour être déterminées, la connaissance de l'unité de sensation qui est impossible à assigner, et celle du minimum susceptible de produire une sensation qui est

essentiellement variable avec l'état de la rétine et la nature de la source.

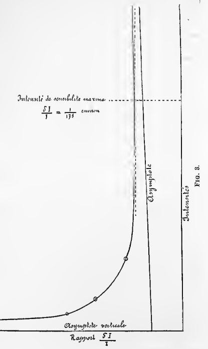


FIG. 3.

L'étude mathématique montre que dans certaines conditions on pourrait avoir, au lieu d'une fonction logarithmique, une fonction de la forme arc tg. Il suffirait d'une très petite déformation de l'hyperbole expérimentale.

Des expériences avec des traits colorés ont montré que la lumière de sensibilité maxima n'était pas la même pour les diverses couleurs se détachant sur fond blanc. J'ai vu ainsi que l'intensité de sensibilité maxima pour le rouge sur blanc était un peu moindre que pour le noir sur blanc.

Définition de la sensibilité en lumière colorée. — Pour définir une différence d'intensité et de couleur simultanée, il faut avoir recours à une construction à trois dimensions, et non plus seulement à une construction plane, comme dans le cercle de Newton, ou le triangle de Maxwell. J'ai montré qu'on pouvait, en restant conforme aux règles de Grassmann, représenter les teintes en grandeur et en direction par des vecteurs, qui se composent comme des forces, tous les vecteurs représentant des teintes différentes de même énergie, ramenés à être co-initiaux, ayant leurs extrémités dans un même plan. L'analyse spectrale de deux teintes permettrait sur cette construction de représenter par un vecteur déterminé leur différence. On peut démontrer le théorème fondamental suivant. *Le lieu des extrémités des vecteurs représentatifs des teintes les plus voisines d'une teinte A que l'œil peut en distinguer, est un ellipsoïde ayant comme directions conjuguées la ligne d'égale teinte et le plan d'égale énergie passant par le point A. C'est l'ellipsoïde de sensibilité autour du point A.*

Ceci permet de démontrer mathématiquement, en s'appuyant sur les lois de la fatigue de l'œil, que, pour distinguer le mieux possible deux plages peu différentes, quelle que soit leur différence, il faut laisser l'œil errer librement sur la plage à étudier. C'est d'ailleurs là un acte instinctif. Ces mouvements tendent en effet à faire sortir de l'ellipsoïde de sensibilité le point représentatif de la teinte à distinguer.

Teinte parasite. — L'étude expérimentale des ellipsoïdes de

sensibilité serait d'ailleurs inutile au point de vue pratique; quelques propriétés simples des corps colorés vont nous montrer comment, sans aborder cette étude, on peut améliorer la vision des détails en lumière colorée.

L'étude spectroscopique des couleurs pigmentaires montre qu'elles diffusent la couleur dont elles ont l'aspect comme le papier blanc, et les autres moins que celui-ci. La teinte dont la couleur porte le nom ne sert donc à rien au point de vue de la différenciation de la plage, elle lave le champ total d'une intensité lumineuse qui fatigue l'œil inutilement, et abaisse sa sensibilité. J'appelle cette teinte la teinte parasite.

Si, en lumière blanche, il n'y a pas moyen d'augmenter la sensibilité de l'œil, il n'en est pas de même quand il y a une teinte parasite. Dans ce cas, et si la teinte parasite est rouge, on peut l'éliminer par divers procédés. C'est le cas qui se présente dans l'observation, très importante au point de vue pratique, des éruptions cutanées, comme l'étude spectroscopique me l'a montré.

Dans ce cas, on peut photographier le sujet. Les rayons rouges n'ayant pas d'action sur la plaque sont ainsi éliminés. En employant de plus la longue pose, on peut arriver à voir des détails de pigmentation rouge que l'œil ne perçoit pas directement. C'est une explication analogue qu'il convient de donner pour la découverte photographique des falsifications d'écritures. Dans ce cas, l'encre est en effet enlevée par l'eau chlorée, et il reste une légère trace jaunâtre que l'œil ne voit pas, mais que la plaque révèle.

Il existe certains verres colorés qui absorbent le rouge et laissent passer les radiations très réfrangibles. L'emploi de ces verres perfectionne beaucoup la vision des éruptions cutanées, ainsi que celle des teintes pigmentaires rouges.

Vision des éruptions cutanées. — Ces études théoriques m'ont amené à préciser les conditions les plus favorables pour l'observation des éruptions cutanées. Il faut proscrire d'abord les appartements tendus de couleurs rouges. Si on emploie la lumière artifi-

cielle, il faut employer les sources riches en rayons réfrangibles, comme le bec Auer ou l'arc électrique. Il est bon, dans les cas douteux, d'armer l'œil d'un verre bleu, tout en opérant par vision binoculaire, et éliminant toute lumière latérale qui pénétrerait dans l'œil sans avoir traversé le verre. Il faut dans ces conditions observer à un éclairage intense. Les meilleurs verres sont les verres bleu Isly du commerce. On peut aussi employer les verres au cobalt. Le mieux est de choisir ceux qui donnent la meilleure vision des petites irrégularités de couleur que présente toujours la peau, par exemple la zone de congestion invisible à l'œil nu qui entoure toujours les petites stases sanguines de couperose.

Résultats cliniques. — J'ai étudié par ces procédés des eczémas, des rougeoles et des syphilis. On peut en général ainsi caractériser une éruption de rougeole ou d'eczéma 24 heures avant que l'œil ne permette de l'affirmer. On peut en voir des traces longtemps après. L'examen au verre montre autour des taches légères une zone plus étendue et estompée pendant la période d'accroissement de l'éruption ; les taches sont au contraire comme découpées à l'emporte-pièce pendant la régression. C'est là un élément important à connaître, car une rougeole dont l'éruption ne suit pas une marche normale est en général très grave.

Pour la syphilis, la roséole laisse des traces de son passage qui peuvent durer une dizaine de jours après que l'éruption a cessé d'être visible à l'œil nu. Les syphilides de la peau de la période tertiaire peuvent laisser des traces indélébiles, invisibles autrement qu'avec le verre coloré.

Toutes ces observations, que je résume brièvement, sont d'ailleurs rendues très délicates par la sensibilité même du procédé. Les éruptions invisibles à l'œil nu sont difficilement visibles avec le verre, et une morsure même relativement ancienne de parasite, une congestion légère de la peau due à une cause quelconque peuvent tromper l'observateur. Il en est de même des marbrures que la peau présente souvent à l'état normal. Il faut donc avant tout être très circonspect, et ne rien conclure sans avoir reconnu

les qualités de forme et de localisation de l'éruption cherchée.

Enfin, dans certains cas, j'ai pu voir avec le verre coloré des éruptions qui n'ont jamais été visibles à l'œil nu.

Si l'affirmation est délicate dans tous les cas, elle l'est plus encore dans celui-là. Trois observations m'ont cependant paru bien nettes à cet égard.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Outre ma thèse et certains articles cités à propos de la photométrie :

Procédés physiques d'observation des éruptions cutanées. *Presse médicale*, juillet 1894.

Sur le fonctionnement de l'appareil nerveux visuel. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Caen*, 1894.

Essai de théorie des images accidentelles sur fond obscur. *Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Caen*, 1894.

Sur le rendement de l'œil. *L'Eclairage électrique*, janvier 1896.

Les images subjectives normales et pathologiques. *Société de biologie*, janvier 1897.

§ 2. — **Acoustique physiologique.**

D'après les idées classiques, il y a trois qualités du son, l'intensité, la hauteur, et le timbre. L'intensité dépend de l'amplitude des vibrations, la hauteur dépend de leur période, le timbre dépend de certains attributs de la forme de la vibration.

Pour la lumière nous voyons une loi analogue. La notion physiologique de couleur est certainement liée à la période de la vibration lumineuse. Mais les expériences de Charpentier pour les faibles intensités, de Helmholtz pour les fortes intensités, ont montré que la notion de couleur n'est pas absolument indépendante de l'intensité. Quand on emploie de très faibles intensités, la notion de lumière précède toujours celle de couleur. Il y a pour toute couleur une intensité au-dessous de laquelle elle paraît grise. Quand l'intensité devient très grande, toutes les couleurs tendent de même vers le blanc.

J'ai cherché s'il n'y avait pas pour le son un phénomène analogue. Une étude approfondie m'a montré que le son monte quand l'intensité diminue, et cela dans toutes les circonstances. Le phénomène semble plus net quand les sons sont plus bas. Cependant une mesure exacte montre qu'il est le même dans toute l'étendue de la gamme. La mesure a été faite de la façon suivante :

Un sonomètre est accordé sur un diapason fortement excité. On laisse le diapason s'arrêter. Quand le son est à peine perceptible on pince la corde du sonomètre avec la même force que précédemment et on l'arrête aussitôt avec le doigt. L'accord physiologique n'existe plus. On déplace alors un chevalet mobile du sonomètre jusqu'à ce que l'accord apparent soit rétabli, et on constate que le déplacement du chevalet mobile est indépendant de la hauteur du son. La différence de hauteur apparente entre le son maximum possible avec un diapason muni de son résonateur et excité par un archet, et le minimum de son perceptible dû à ce même diapason, est de 1/5 ton environ. Des expériences variées de toutes les façons m'ont montré qu'il ne s'agissait pas là d'un phénomène mécanique, mais d'un phénomène physiologique. Nous pouvons donc dire que la hauteur d'un son dépend essentiellement de sa période et accessoirement de son intensité.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Influence de l'intensité sur la hauteur du son. Note présentée par M. Cornu. *C. R.*, juin 1897.
Influence de l'intensité sur la hauteur du son. *Société de biologie*, juin 1897.

§ 3. — **Muscle.**

(En collaboration avec le professeur Charles Richet.)

Dans ces études, nous avons passé en revue diverses propriétés du muscle. Nous avons commencé par étudier ses propriétés au point de vue du développement de la chaleur.

Variation thermique négative. — Il y a dans le dégagement de chaleur par le muscle des irrégularités observées depuis Solger, par Danilewsky entre autres. Dans ses expériences sur le biceps M. Chauveau a observé, au début de la contraction, la même irrégularité. On professe en général que le muscle s'échauffe en fonctionnant. L'irrégularité dont nous parlons est un refroidissement du muscle au début du travail. Danilewsky, dans ses tentatives pour mesurer l'équivalent mécanique de la chaleur sur les muscles de grenouille, a été gêné souvent par ce phénomène, qui aurait dû lui montrer l'impossibilité de faire cette mesure dans les conditions où il était placé, le corps en expérience n'ayant pas parcouru un cycle fermé.

M. Chauveau a expliqué ces observations, dans le cas où il était placé, par des phénomènes circulatoires, le muscle contracté chassant le sang qui lui apporte de la chaleur. Il y a donc un refroidissement au début, par rayonnement, puis un réchauffement.

Les phénomènes qui se produisent lors de la contraction normale sont en effet susceptibles d'être ainsi interprétés. Nous avons cependant montré qu'il y avait d'autres conditions où un refroidissement se produisait sans pouvoir être ainsi expliqué.

Les expériences ont été faites sur les muscles de la cuisse du chien tétanisés électriquement. L'appareil employé pour la mesure de température était une mince soudure nickel laiton, le galvanomètre, un Thomson de 8 ohms muni d'un équipage à aiguilles verticales. L'une des soudures était plongée dans les muscles, l'autre dans la glace fondante. L'équipage galvanométrique était ramené au zéro au moyen d'un aimant normal au champ directeur, qui annulait le couple dû aux bobines. Dans ces conditions l'appareil, à 12" d'oscillation simple, était assez stable, et donnait 1 millimètre de déviation pour 0,001 de degré. Dans ces conditions, quand le chien est à température normale, on voit parfois un très léger mouvement de l'aiguille du côté du refroidissement, mais il est irrégulier, et peut s'expliquer par un petit déplacement de la soudure au moment de la contraction. Un échauffement considérable se produit ensuite. Les phénomènes restent les

mêmes jusqu'à ce que la température rectale de l'animal soit tombée aux environs de 26°. Dans ces conditions, on voit fréquemment un abaissement de température d'autant plus grand que la tétanisation est plus forte.

Cet abaissement se produit toujours, et avec une intensité considérable, quand on fait l'anémie du muscle, en liant l'aorte par exemple, ou quand on produit l'asphyxie. Dans ce cas, il se produit un refroidissement d'autant plus grand que l'excitation est plus grande, et quand l'état d'asphyxie est suffisamment avancé, il n'y a jamais production d'un réchauffement par prolongation de contraction. Nous avons eu ainsi des refroidissements qui ont dépassé 0,5 degré en quelques minutes. Le même phénomène se produit à coup sûr quand l'animal vient d'être tué.

Au premier abord, cela semble incompatible avec les principes de la thermodynamique. Nous avons cependant en électricité des phénoménes susceptibles de nous guider vers une explication.

L'énergie dépensée dans le muscle est certainement d'origine chimique comme l'énergie mise en liberté par la pile électrique. Mais,à côté des phénomènes chimiques, réactions exoénergétiques dont la présence est indispensablo, il peut y avoir des phénomènes physiques, de dissolution par exemple,qui se font avec absorption d'énergie sous forme de chaleur (1).

C'est ainsi que dans l'élément Latimer Clark,une partie de l'énergie recueillable dans le circuit extérieur, est empruntée au milieu extérieur sous forme de chaleur. Dans le tétanos musculaire l'énergie libérée est consommée tout entière sur place,pour créer le champ de force musculaire, et sans travail extérieur produit. Le phénoméne est tout à fait analogue à ce qui se produit dans le raccourcissement d'une spirale parcourue par un courant électrique, pour prendre une comparaison de Fick. Deux cas peuvent donc se produire : ou l'énergie disponible sera tout entière transformée en chaleur, et alors le résultat final sera forcément pour le systéme un accroissement de température, ou bien une partie de l'énergie

(1) Voir à ce sujet : LIPMANN. *Thermodynamique.* — DUHEM. *Le potentiel thermodynamique.*

sera employée à produire des réactions endo-énergétiques, et il pourra y avoir manifestation du refroidissement dû aux phénomènes physiques.

Contraction anaérobie.—Le phénomène de refroidissement que nous avons observé, dans le cas de la contraction que nous avons par la suite appelée anaérobie, doit donc être accompagné de réactions chimiques particulières qui ne se produisent pas dans la contraction normale. Nous n'avons pas abordé le problème par la méthode chimique, mais la simple observation des propriétés de la contraction anaérobie montre qu'un phénomène nouveau se produit. Quand un muscle travaille dans l'état de contraction anaérobie, sous l'anémie ou sous l'asphyxie, il arrive promptement à la ruine complète.

Nous avons étudié ce phénomène en détail. Quand on fait l'asphyxie de l'animal pendant une série d'excitations électriques rythmées, on voit d'abord la hauteur de contraction rester invariable, pendant environ trois ou quatre minutes. Puis, si l'excitation est assez puissante, on voit le muscle diminuer ses contractions d'une manière régulière. Si on rend l'oxygène quand les contractions ne sont pas encore trop faibles, on voit le muscle se restaurer rapidement ; dans ces conditions, il se restaure plus vite quand il est soumis aux excitations électriques que quand on le laisse au repos. Si au contraire on prolonge l'expérience au delà d'une certaine limite le muscle est complètement ruiné, et quand on lui rend l'oxygène, il ne peut plus se contracter. Même quand on lui rend l'oxygène alors qu'il se contractait encore un peu, si on le fait travailler électriquement, on le voit se ruiner rapidement. Donc l'action de l'excitation électrique sur ces muscles est variable suivant leur état. Si la ruine n'est pas trop avancée l'excitation électrique est favorable, mais si la ruine est trop avancée l'excitation électrique est nuisible. Un fait remarquable nous a été montré par ces recherches, c'est que la langue se comporte d'une manière toute différente des autres muscles. Elle résiste au travail anaérobie tant que l'animal lui-même peut résister à l'asphyxie.

L'étude des animaux refroidis nous a montré que l'état anaérobie se produisait d'une manière irrégulière quand la température était assez base, et c'est à cela que nous attribuons les refroidissements par contraction que nous avons souvent observés dans ce cas.

Nous tirerons de là une conclusion pratique, c'est que dans les myopathies d'origine vasculaire, il faut proscrire le traitement électrique.

Études ergométriques. — *Travail continu.* — Nous avons aussi étudié la fatigue du muscle soumis à des contractions rythmées. De nombreuses expériences ont été faites à ce sujet sur le muscle de grenouille. Sur le muscle de l'homme des expériences ont été faites par Mosso et ses élèves. Mais ils ont étudié la fatigue du muscle poussée jusqu'à l'impossibilité de contraction, au moyen de poids très considérables. La méthode employée était l'enregistrement des hauteurs de contraction. Nous avons cherché au contraire à étudier les régimes que le muscle pouvait soutenir pendant longtemps. L'instrument pour la mesure de la puissance du muscle, c'est-à-dire du travail par minute, est une modification du collecteur de travail de Fick, où la lecture est faite au moyen du vélocimètre ordinaire de l'industrie. Les lectures étaient faites toutes les minutes. Le mouvement employé dans les études déjà faites est la flexion de l'index. Nous faisons construire en ce moment un appareil permettant d'opérer avec des muscles plus puissants, le biceps et le soléaire.

Nous avons vu dans ces études que le muscle pouvait atteindre un régime permanent maximum parfaitement défini, possible à soutenir pendant plus de deux heures. Une augmentation de 0,1 dans la puissance met bientôt le muscle dans l'impossibilité de continuer. Nous avons étudié le régime permanent en fonction du poids tenseur et de la fréquence des contractions réglée au moyen d'un métronome. La valeur de l'effort ayant une influence considérable, nous avons dû employer un gant spécial tel que la corde qui soutenait le poids tenseur fût toujours à la même place sur l'article

mobile, sans cela les résultats n'auraient pas été comparables d'un jour à l'autre.



Fig. 4.

Mais malgré ces précautions l'état du muscle ne peut être considéré comme absolument constant. Dans les premières minutes u travail, une crampe apparaît fréquemment qu'il faut surmon-

ter pour pouvoir arriver au régime permanent. Quand cette crampe est surmontée, on voit se produire une augmentation d'excitabilité, due probablement à la vaso-dilatation étudiée par M. Chauveau sur le releveur de la lèvre du cheval. Pour arriver à éliminer cette cause de perturbation, nous avons fait des expériences croisées, et nous avons pris la moyenne de toutes les expériences. Nous avons ainsi obtenu les lois qui correspondent à un état moyen de notre muscle. La régularité des courbes obtenues montre que la méthode est bonne.

Nous concluons de ces expériences que les poids qui permettent à l'index de développer sa puissance maxima en régime continu sont compris entre 700 et 1,000 grammes, la corde étant fixée au niveau de l'interligne phalangino-phalangettien.

L'étude des fréquences nous a amenés à une conclusion intéressante. Nous avons vérifié dans de très larges limites, comme on le voit sur la figure 4 ci-jointe, la loi de Nawalichin modifiée par M. Chauveau. Un grand nombre de petites contractions partant de l'état de relâchement fatigue moins le muscle qu'un nombre moindre de contractions plus hautes donnant le même travail. Il y a évidemment une limite à la fréquence possible. Si on dépasse la fréquence de 250, la puissance maxima continue diminue très vite.

Un fait remarquable qui ressort de ces expériences, c'est la faible variation de la puissance avec le poids, tant que celui-ci reste dans la limite moyenne de 700 à 1,000 grammes.

Travail intermittent. — Nous avons ensuite étudié le cas où, au lieu d'imposer au muscle un travail continu, on lui impose un travail coupé de repos. Nous nous sommes bornés au cas où les temps de repos sont égaux aux temps de travail. Nous avons alors vu que, tant que les temps de repos ne dépassaient pas 30" leur valeur avait une faible influence sur la puissance moyenne prise en divisant le travail produit par le temps total de travail et de repos. Cependant les conditions les plus favorables ont lieu quand les alternatives de repos et de travail sont d'environ deux secondes. Dans ces conditions, un fait domine tous les autres, c'est que la fatigue au moyen de laquelle le régime permanent

maximum est déterminé est beaucoup moins pénible à supporter que dans le cas du travail continu, et cependant ce régime permanent maximum est parfaitement bien déterminé. L'entraînement instantané a lieu comme dans le travail continu. Quant aux conclusions relatives à la grandeur du travail, il faut distinguer trois cas : celui des poids faibles (inférieurs à 500 gr.), celui des poids moyens (500 à 1,000 gr.), celui des poids forts (au-dessus de 1,000 grammes).

Dans le premier cas, les intermittences sont défavorables, dans le second elles sont indifférentes, dans le troisième elles sont très utiles. Il résulte de nos très nombreuses expériences que les conditions de travail maximum en régime permanent pour l'index sont les suivantes :

Un poids très fort (1,500 grammes).

Une fréquence très grande (le métronome bat 200 par minute).

Des alternatives de repos et de travail de 2 secondes environ.

Ces expériences sont relatives à un muscle de faible puissance, dont le travail et la fatigue ne produisent par conséquent que des réactions générales négligeables, les lois qui en résultent sont donc des propriétés pures du tissu musculaire.

Il nous paraît probable, sans que cependant nous puissions le démontrer rigoureusement, que c'est par le sang oxygéné que se fait la réparation du muscle, et que l'oxygène détruit les produits nocifs de la contraction musculaire.

Des contractions répétées, énergiques et continues, en épuisant l'oxygène du sang irrigateur mettent le muscle dans cet état de contraction anaérobie que nous avons démontré, dans un précédent travail, était funeste à la vie musculaire. Donc, plus la circulation sera active, moins il y aura à craindre l'état anaérobie, et par conséquent la ruine du muscle.

L'influence des intermittences semble en résumé se ramener à ces deux lois fondamentales : 1° Le maximum de la circulation musculaire a lieu lorsque le repos succède au travail (Chauveau). 2° La contraction est d'autant plus puissante et d'autant moins douloureuse que la circulation est plus active.

Il est probable qu'avec les muscles plus puissants sur lesquels nous allons opérer maintenant, les résultats seront modifiés par les réactions générales de l'organisme.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Effets thermiques de la contraction musculaire étudiés par les mesures thermo-électriques, par MM. André Broca et Charles Richet. *Société de biologie*, 1896.

De l'influence de la circulation sur les phénomènes thermiques de la contraction musculaire, par MM. André Broca et Charles Richet. *Société de biologie*, 1896.

Contraction aérobie et contraction anaérobie du muscle. Note de MM. André Broca et Charles Richet. *Société de biologie*, 1896.

Contraction anaérobie, par MM. André Broca et Charles Richet. *Archives de physiologie*, 1896.

Effets de l'électricité sur les muscles privés d'oxygène, par MM. André Broca et Charles Richet. *Archives d'électricité médicale*, 1896.

Expériences ergométriques sur la contraction musculaire en régime permanent maximum. Méthodes et appareils. Note de MM. André Broca et Charles Richet, présentée par M. Marey. *C. R.*, 1898.

Expériences ergométriques sur la contraction musculaire en régime permanent maximum. Note de MM. André Broca et Charles Richet, présentée par M. Marey. *C. R.*, 1898.

Influence des intermittences sur le travail musculaire. Note de MM. André Broca et Charles Richet, présentée par M. Marey *C. R*, 1898.

De quelques conditions du travail musculaire chez l'homme. Études ergométriques, par MM. André Broca et Charles Richet. *Archives de physiologie*, 1898.

§ 4. — Système nerveux.

(En collaboration avec le professeur Charles Richet.)

Nous nous étions proposés comme but l'étude des phénomènes de fatigue du système nerveux, et surtout celle des phénomènes asphyxiques. Nous voulions en effet comparer à ce point de vue le système nerveux et le muscle qui nous avait déjà donné d'inté-

ressants résultats. C'est en poursuivant ces recherches avec une technique appropriée, qu'un hasard heureux nous a amenés à la découverte d'un phénomène heaucoup plus intéressant, celui de la période réfractaire.

Période réfractaire. — Les expériences ont toutes été faites sur le chien. L'animal était chloralosé. Cetts anesthésis est la seule qui conservs à la suhstance grise une intégrité suffisante pour les expériences. Des trous étaient percés dans le crâne au-dessus de la zone motrics et, après filetage, on y vissait des houtons d'ivoire portant les électrodes. De la sorte les excitations portaient en un point toujours le même. Nous ohservions fréquemment des irrégularités dans les excitations électriques avec des fréquences convenahles, quand un jour nous fûmes ohligés de prendrs un chien choréique, n'en ayant point d'autre. Sous l'action du chloralose sa chorée devint ahsolument rythmique, et nous vîmes alors très nsttement que les sxcitations avaient une valeur très différents suivant la période où elles tomhaient par rapport à la contraction choréique. Ayant pris un signal de Despretz pour indiquer les moments d'sxcitation, nous vîmes que les phénomènes étaient d'une régularité absolus. En somme, chez l'animal choréique, l'intsrvalle entre deux secousses se divise en quatrs périodes égales. Uns premièrs où il y a addition des excitations, une seconde où il y a suppression des excitations, c'est ce que nous avons appelé, par analogie avec cs qui ss passe pour le cœur, la période réfractaire, une troisième où l'excitahilité revient, c'est la période de restitution, la secousse choréique suivant à sa période normale, st enfin une périods où la secousse provoquée et la secousse choréique ss fusionnsnt en s'additionnant.

Il s'imposait de chercher si des phénomènes analogues ne se passaisnt pas dans ls cervsau normal. Les expériences ont été faites avec deux chariots de Duhois Rsymond, dont lss primaires étaisnt munis chacun d'un signal de Despretz. L'un était réglé à une interruption par seconde, le second était intsrrompu à la main. Nous avons alors constaté que, sur le cervsau normal, dss phéno-

mènes identiques aux précédents se passaient, période d'addition et période réfractaire, mais que tout le phénomène était terminé en 0",1, au lieu de 1" chez le chien choréique.

Ces phénomènes ont lieu également avec les excitations réflexes, produites par exemple en frappant la table avec un marteau. L'animal chloralosé réagit alors énergiquement. Il en est de même quand on provoque le réflexe auditif.

Pour expliquer ce phénomène, nous avons d'abord pensé à une action chimique, épuisement d'une charge de matière active dans la cellule. Mais cette idée est incompatible avec l'existence de la période d'addition, et avec la possibilité de la tétanisation. C'est alors que nous avons pensé à une explication purement physique du phénoméne. Le systéme nerveux est en effet une installation pour le transport d'énergie à distance, nous devons donc nous attendre à voir se produire des phénoménes analogues à ceux que nous connaissons dans tous les champs de force. Dans les idées modernes on ne conçoit pas l'existence d'un champ de force autrement que par la déformation d'un milieu. Si la cause de l'équilibre contraint de ce milieu vient à cesser brusquement, il doit revenir à son état d'équilibre naturel par une série d'oscillations amorties. Les champs électriques nous donnent des exemples de ce fait, le principe de l'action de milieu tient dans la physique actuelle un rang presque égal à celui du principe de la conservation de l'énergie. Si nous l'admettons pour le système nerveux, nous devons trouver lors de la cessation brusque d'un acte cérébral des ondulations de retour à l'équilibre analogues à celles des champs électriques. C'est pour arriver mathématiquement à ce résultat que j'ai entrepris la théorie générale des champs de force dont j'ai parlé dans mes travaux relatifs à l'électricité. Le fait que le nerf est le siége du courant d'action suffit pour établir que c'est un lieu de transformation de l'énergie, donc qu'on pourra rendre compte des faits par l'existence d'un courant agissant comme un courant électrique suivant la loi de Laplace. Ceci ne comporte aucune hypothése sur la nature des phénomènes nerveux. Pour achever la démonstration rigoureuse de l'existence des oscillations de retour à l'équilibre, il faut montrer la

généralité des lois de l'induction. J'ai dirigé de ce côté des recherches qui me donnent bon espoir. En admettant ces principes, nous devons retrouver pour les ondulations nerveuses toutes les lois de la synchronisation des systèmes oscillants. Nous les avons vérifiées dans tous leurs détails. Nous avons vu que les excitations nerveuses, quand on resserrait le rythme des excitations électriques,

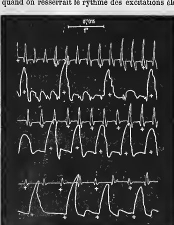


FIG. 5.

commençaient par les suivre, puis que, subitement, elles ne répondaient plus qu'une fois sur deux, que ce rythme toujours à un sur deux se resserrait, pour donner ensuite les rythmes à un sur trois, puis à un sur quatre. La figure ci-jointe montre ce phénomène, les excitations étant produites par des chocs sur la table, ce qui provoque chez l'animal chloralosé des réflexes considérables.

Si au contraire on maintient constante la fréquence des excita-

tions, on voit une période de trouble précéder la période d'état comme dans toutes les expériences de synchronisation (fig. 6 et 7).

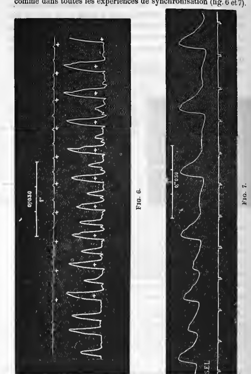


FIG. 6.

FIG. 7.

Nous pouvons, en prenant les valeurs de l'excitabilité après une excitation, avoir une idée de la forme de la courbe du retour à l'équilibre du système nerveux. C'est la forme de la figure 8, ci-jointe, la partie supérieure de la courbe étant la période d'addition, la partie inférieure la période réfractaire. Or c'est là une courbe qui ne peut être réalisée dans le retour à l'équilibre d'un système abandonné à lui-même. Mais si au lieu de faire cesser simplement la cause de l'équilibre contraint on la fait cesser en donnant successi-

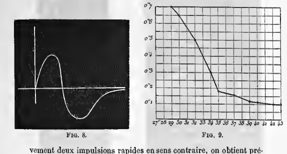


FIG. 8. FIG. 9.

vement deux impulsions rapides en sens contraire, on obtient précisément cette forme. C'est celle que Sir W. Thomson a réalisée pour la transmission la plus économique des dépêches dans les câbles sous-marins. Elle necessite l'existence d'une ondulation de 0,05 environ. C'est précisément là la période du bruit musculaire ; et il ne fait de doute pour personne que la cause de ce bruit soit dans une ondulation cérébrale.

Action de la température. — Il nous restait à étudier la période réfractaire en fonction de la température. Nous l'avons fait en notant les fréquences pour lesquelles apparaissaient les premières irrégularités. Nous avons alors trouvé la courbe ci-jointe, figure 9.

Temps perdu des réflexes chez le chien. — L'étude de la période réfractaire nous amène à connaître la fin de l'ondulation

nerveuse quand une excitation vient de cesser. Il serait intéressant d'avoir quelques données sur la transmission directe d'un acte volontaire, pouvant se rapprocher de celles que nous avons acquises sur la période réfractaire. C'est ce qui nous a poussés à étudier le temps perdu des réflexes chez le chien chloralosé, en fonction de la température. Nous avons employé les procédés de mesure habituels pour cette étude et nous avons trouvé les nombres suivants :

40°	0",042	36°	0",049	31°,5	0",080
39°	0",045	35°	0",050	29°	0",1
37°	0",048	34°	0",060		

En construisant la courbe de cette quantité en fonction de la température, on obtient une courbe presque exactement superposable à celle de la période réfractaire. Il est donc bien probable que les deux phénomènes sont de même nature.

Action de l'asphyxie et de l'anémie sur le cerveau. — Après avoir ainsi suivi la voie qui s'était offerte à nous, nous avons repris la question qui nous avait préoccupés au début, celle du fonctionnement du cerveau sans oxygène. Nous avons vu que la fonction cérébrale était bien plus délicate à ce point de vue que la fonction musculaire, car au bout de 3' dans l'asphyxie, au bout de 30" dans l'anémie, toute excitabilité a disparu. Mais si l'excitabilité disparaît plus vite, c'est pour protéger plus efficacement la fonction, car cette inexcitabilité met le cerveau à l'abri de ce fonctionnement forcé anaérobie qui ruine le muscle. Quelqu'excitation qu'on ait fait subir au cerveau pendant l'anémie, excitation à laquelle il n'a pas répondu, sa fonction se rétablit quand on lui rend de l'oxygène. Mais ce retour d'excitabilité est particulier, car il se fait par périodes successives d'excitabilité et d'inexcitabilité.

En somme, nous tirerons de tous ces travaux deux conclusions : le système nerveux est protégé contre les dangers de la vie anaérobie par un processus que nous ne connaissons pas.

Il est le siège d'un champ de force soumis aux mêmes lois générales que les autres champs de force connus.

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Période réfractaire dans les centres nerveux du chien choréique. Note de MM. André Broca et Charles Richet. *Société de biologie*, 1896.

Période réfractaire dans les centres nerveux. Note de MM André Broca et Charles Richet, présentée par M. Marey. *C. R.*, 1897.

Période réfractaire dans les centres nerveux, ondulations nerveuses, et conséquences qui en résultent au point de vue de la dynamique cérébrale. Note de MM. André Broca et Charles Richet, présentée par M. Marey. *C. R.*, 1897.

Période réfractaire et synchronisation des oscillations nerveuses. Note de MM. André Broca et Charles Richet, présentée par M. Marey. *C. R.*, 1897.

Les théories possibles de la période réfractaire. *Conférence faite à l'Institut Solvay* en février 1897, par M. André Broca. (Elle avait été précédée d'une conférence du professeur Charles Richet sur la partie expérimentale des phénomènes.)

Réflexes provoqués par des excitations acoustiques, etc. Note de MM. André Broca et Charles Richet. *Société de biologie*, 1897.

Vitesse des réflexes chez le chien et variation de la température organique. Note de MM. André Broca et Charles Richet. *Société de biologie*, 1897.

Période réfractaire dans les centres nerveux, par MM André Broca et Charles Richet. *Archives de physiologie*, 1897.

Refractory period in the nerve centres. *British Association*. Toronto.

IMPRIMERIE LEMALE ET Cie, HAVRE